

УДК 621.396.677:621.357.6

В. С. Гудрамович, А. П. Гайдученко, А. И. Коваленко

Інститут технічної механіки НАНУ—НКАУ, Дніпропетровськ

**Технологии
изготовления
устройств
антенно-волноводной
техники
и
солнечной
энергетики,
основанные
на
методе
электролитического
формования**

Надійшла до редакції 30.01.01

Наведено результати розробок технологій виготовлення різноманітних пристрій антенно-хвилепровідної техніки і сонячної енергетики. Технологічні процеси засновано на методі електролітичного формування. На підставі запропонованих технологій розроблені відповідні технологічні процеси і виготовлені антени, хвилепроводи, концентруючі системи електромагнітної і сонячної енергії, які використовуються в ракетно-космічній техніці і зв'язку.

ВВЕДЕНИЕ

К конструкциям антенно-волноводной техники (АВТ) и солнечной энергетики (СЭ) предъявляются высокие требования. Они обусловлены необходимостью высокой точности изготовления, требованиями к однородности структуры материала, высокому качеству, отражающих токопроводящих поверхностей, что должно обеспечивать повышенные электромагнитные и оптические свойства. Необходимо обеспечение оптимальных массогабаритных характеристик в сочетании с требуемыми прочностными и жесткостными свойствами. При изготовлении устройств АВТ и СЭ возникают многие сложные технологические проблемы: изготовление элементов переменной толщины, изготовление металлических концентраторов различных размеров со значительной жесткостью и малой (переменной) толщиной, изготовление волноводов в виде неразборных блоков с изменяющимися по длине каналов поперечными сечениями, создание криволинейных волноводов с тонким каналом, в том числе переменного сечения, создание конструкций антенн (пара-

лических, рупорных, щелевых), волноводов и концентраторов солнечной энергии сложной конфигурации (в частности, с вращенными ребрами в рупорных антенах, формирующими диаграмму направленности), изготовление концентрирующих систем с подкрепляющим тонкую металлическую отражающую поверхность полимерными слоями (в частности, коллимационных зеркал), увеличивающими жесткость системы и др.

Для изготовления многих изделий АВТ и СЭ могут быть с успехом использованы технологические процессы, основанные на методе электролитического формования. Другие технологии (литье, штамповка, различные виды механической обработки — фрезерование и др., электрохимическая обработка, прессование) по ряду причин менее эффективны. К таким причинам относятся высокая энергоемкость и трудоемкость технологических процессов, значительный расход материала, трудности достижения высокой чистоты отражательных поверхностей, возникновение при использовании таких технологий неоднородностей структуры, остаточных напряжений, которые отрицательно ска-

зываются при дальнейшей эксплуатации, и др.

Конструкции АВТ и СЭ, изготовленные на основе технологий, использующих метод электролитического формования, отличаются высокой точностью изготовления, малой массой, идентичностью воспроизведения поверхностей сложной формы и регулируемой равномерностью распределения осадков при электроформовании, что обеспечивает степень однородности структуры. Поверхность гальванического осадка является точной копией поверхности катода-матрицы, при этом на одной матрице может быть изготовлено большое количество одинаковых изделий. В качестве материалов для изготовления изделий может быть использован никель, алюминий, медь, серебро, инвар (сплав железа и никеля). Метод электролитического формования позволяет изготавливать тонкостенные конструкции АВТ и СЭ при использовании минимального количества материалов.

Соответствующие технологии относятся к безотходным и энергосберегающим.

Разнообразные устройства АВТ (антенны, волноводы различного назначения) относятся к основным в ракетно-космической технике, технике связи [2, 11, 17]. Концентраторы солнечной энергии могут использоваться в бортовых системах электропитания космических аппаратов [17, 20, 23].

Отметим, что солнечная энергия относится к наиболее перспективным экологически чистым видам энергии. Освоение ее с целью получения электроэнергии идет по двум основным направлениям: фотоэнергетика, когда улавливается электромагнитное излучение оптического диапазона Солнца и с помощью фотоэлементов превращается в электрический ток (сюда относятся и упомянутые выше системы электропитания), термодинамическое, когда энергия Солнца используется для получения пара, применяемого в турбинах с генератором [22]. Перспективно использование концентраторов как элементов солнечных печей для производства материалов с особыми свойствами [3].

Существуют проекты получения электрической энергии из энергии Солнца в космосе с помощью орбитальных станций [4, 18, 25, 29]. Используемые здесь передающие и приемные антенны — ректены для передачи и приема СВЧ-излучения также являются концентраторами лучистой энергии. Несмотря на дороговизну таких проектов, считается, что они перспективны.

Для всех вышеуказанных систем АВТ и СЭ с успехом может быть применен метод электролитического формования. Нами разработаны эффективные технологические процессы для изготовления ряда изделий техники [8, 10, 11, 17, 19, 27, 28].

Некоторые изделия АВТ и СЭ, изготовленные в Институте технической механики НАНУ—НКАУ, использованы в ракетно-космической технике Украины и России в 1978—2000 гг. (ГКБ «Южное» им. М. К. Янгеля, «Южмаш» им. А. М. Макарова; НИИ космического приборостроения (Москва), НПО им. С. А. Лавочкина, НПО измерительной техники (Московская область), НПО прикладной механики (Красноярск), КБ «Полет» (Омск) и др.).

Ниже изложены результаты работ по созданию технологий изготовления различных устройств АВТ и СЭ на основе метода электролитического формования.

ОСНОВЫ МЕТОДА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ. ТИПОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АНТЕННО-ВОЛНОВОДНОЙ ТЕХНИКИ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Основой метода электролитического формования является открытие Б. С. Якоби (1838 г.) явления гальванопластического копирования [24]. Промышленное применение метода вначале было незначительно (известно использование его для производства бесшовных труб, печатных стереотипов, фольги, сеток и др.). Только начиная с 1918 г., когда в США на основе метода были изготовлены антенные рефлекторы, началось использование его в различных отраслях техники. Развитие ракетно-космической техники, где было необходимо создание тонкостенных конструкций антенн и волноводов сложной формы, к которым предъявлялись высокие требования, в основном стимулировало развитие метода.

Метод электролитического формования основан на кристаллизации металла из перенасыщенного прикатодного слоя электролита, созданного действием электрического поля. Поверхность осадка при этом является точной копией поверхности катода-матрицы [5, 6, 11].

Метод постоянно совершенствуется (применение электролитов с различными добавками, улучшающими свойства осадков, применение различных материалов для матриц, развитие технологий их изготовления, усложненные технологии, связанные со сложностью формы изделий и повышенными требованиями к прочности и жесткости, технологии изготовления конструкций с подкрепляющими слоями и др.) [6, 8, 10, 11, 27, 28].

Особые требования предъявляются к материалам, используемым для изготовления элементов конструкций АВТ и СЭ. Необходимо использовать материалы с малым коэффициентом линейного расши-

рения и высокими прочностными свойствами, которые могут обеспечивать работоспособность при воздействии специальных факторов (гравитация, вибрация, температура, коррозия, микрометеориты, космические лучи и др.). Для изготовления конструкций АВТ и СЭ могут быть использованы никель, инвар (сплав железа с никелем), медь, алюминий, серебро и др.

Инвар обладает минимальным коэффициентом линейного расширения. Однако применение его для электролитического формования связано с рядом трудностей. Никель обладает высокими прочностными характеристиками, долговечностью, стойкостью к агрессивным средам, допускает высокую чистоту отражательных токопроводящих поверхностей. Среди основных недостатков других материалов, наряду с отдельными положительными свойствами, отмечаются пониженные механические характеристики, высокая стоимость и др. К материалам с повышенными свойствами, используемым для АВТ, относятся углепластики (композиция волокон карбида бора, кевлара, графита со специальными смолами). Технология изготовления изделий из них — специальная тема. Среди недостатков изделий из этих материалов отметим возможность искажения формы, связанную со структурными изменениями в процессе длительной эксплуатации (релаксация, старение), что недопустимо для ряда элементов АВТ.

Кратко опишем типовой технологический процесс для изделий АВТ на основе метода электролитического формования на примере параболического рефлектора, используемого как зеркало антенн или концентраторов для устройств СЭ.

Типовой технологический процесс включает следующие операции: конструирование и изготовление матрицы; подготовка матрицы (механическая полировка, обезжиривание, промывка, монтаж матрицы в электролитической ванне); наращивание металла на матрице (электролитическое осаждение); подготовка к отделению изделий от матрицы; отделение изделия от матрицы (специальные температурные режимы или вытравливание матрицы с помощью химикатов); контроль качества поверхности изделия и состояния матрицы (для последующего изготовления изделий).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ АВТ И СЭ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ

Разработаны технологические процессы изготовления различного вида устройств АВТ и СЭ: парабо-

лические рефлекторы, рупорные пирамидальные антенны, волноводы сложной формы различного назначения, щелевые антенны и антенные решетки, концентраторы солнечной энергии (фоконы, фоклины), рупорные антенны с вращенными ребрами, формирующими диаграмму направленности, коллимационные зеркала, и др.

Технологические процессы изготовления каждого типа вышеупомянутых изделий имеют свои отличительные особенности. Для каждого изделия изготавливается специальная матрица, часто весьма сложной формы, и профилированный анод. Форма анода должна обеспечивать заданное распределение плотности тока на поверхности катода-матрицы. Положение анодов в реакционной зоне подбирается экспериментально или по результатам решения задачи о распределении потенциала в замкнутом токопроводящем пространстве между анодом и катодом. В зависимости от сложности конфигурации изделия и способа отделения его от матрицы, подбирается материал матрицы. Основной материал, из которого изготавливались изделия — никель. При этом использовался никельсульфаминовокислый электролит. Типовой режим осаждения выбирался из условия, что 1 мкм гальванического осадка наращивается за 1.75 мин при плотности тока 3 А/дм². Для других электролитов режим осаждения может быть иным.

Параболический рефlector. Параболические рефлекторы используются в качестве больших и малых зеркал антенн, концентраторов солнечной энергии.

Выше кратко описан технологический процесс изготовления параболического рефлектора. Он состоит из таких последовательных операций: конструирование и изготовление матрицы (в дальнейшем оп1); подготовка поверхности матрицы к осаждению (оп2); электролитическое осаждение металла на поверхность матрицы (оп3); отделение осажденной оболочки рефлектора от матрицы.

Конструкция матрицы рефлектора является телом вращения (параболоид). Рабочая поверхность матрицы представляет точную копию отражающей поверхности рефлектора. Опишем более подробно технологию изготовления рефлекторов. Матрица рефлектора изготавливается из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Подготовка поверхности осаждения включает механическую полировку, обезжиривание органическими растворителями, протирку известью и промывку водой. Процесс осаждения проводился на специально разработанной установке [1, 11]. Установка (применительно к рефлектору диаметром до 2 м) представляет гальваническую ванну объемом до 1.5 м³ с полупогруженной враща-

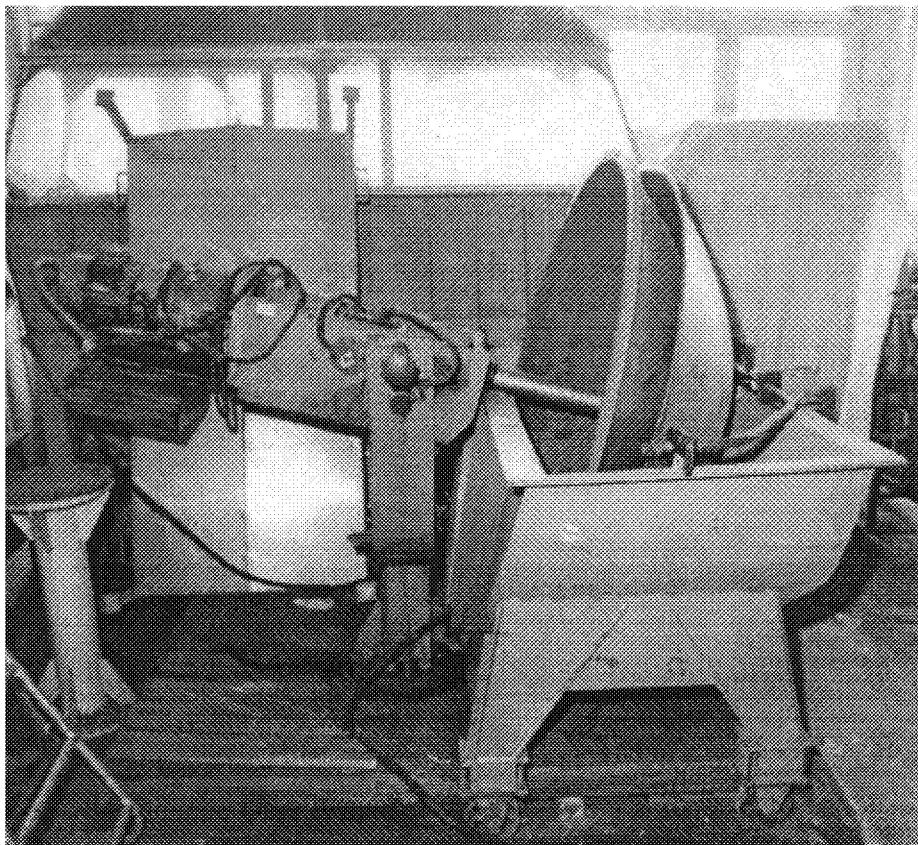


Рис. 1. Установка для изготовления рефлекторов

ющейся катодом-матрицей. Вид ее вместе с изготовленным рефлектором, параметры которого описаны ниже, показан на рис. 1.

Характерной особенностью технологического процесса с использованием этой установки является периодическое погружение матрицы в электролит, что обусловлено ее вращением вокруг оси симметрии и положением относительно уровня электролита в ванне. Скорость вращения матрицы определялась эмпирическим путем, критерием при этом является получение качественной структуры осадка (без питтинга и образования дендритов — технологических наростов). Величина угловой скорости вращения составляет 17 об/мин.

Объединение процессов вращения и погружения матрицы позволяет регулировать толщину основного слоя осажденного металла на поверхности матрицы по заданной программе и обеспечивает визуальный контроль качества осадка.

Основные факторы, которые влияют на структуру осадка: состав и концентрация электролита; анодная и катодная плотность тока; температура

электролита в ванне. Варьируя их, можно улучшать свойства получаемого изделия.

В технологическом процессе изготовления рефлектора использовался электролит следующего состава: сульфаминовокислый никель — 0.5 кг/л, хлористый никель — 6 г/л; борная кислота — 30 г/л; лаурилсульфат натрия — 0.5 г/л. Для предотвращения образования дендритов по краю оболочки рефлектора используется специальный экран-кольцо из материала, не проводящего ток. В процессе электролитического осаждения использовались никелевые аноды.

Процесс осаждения металла на матрицу разделен на два этапа:

- I этап — нанесение первичного слоя толщиной 10–15 мкм (затяжка) при плотности тока $q = 1\ldots2 \text{ А/дм}^2$ и температуре ванны $T_b = 40^\circ\text{C}$ длится $t_1 = 30 \text{ мин}$;
- II этап — интенсивное наращивание основного слоя никеля (формирование изделия) проводится при $q = 5\ldots6 \text{ А/дм}^2$, $T_b = 50\ldots60^\circ\text{C}$ и длится $t_2 \approx 8 \text{ ч}$.

После окончания процесса осаждения и снятия защитного экрана проводится отделение нарошенной оболочки рефлектора от матрицы с использованием эффекта термоудара (резкая смена температуры матрицы).

Для изготовления рефлекторов из металлов (алюминиевые сплавы, медь, латунь и др.) может использоваться также штамповка прессованием, штамповка взрывом (гидроудар) и ротационное выдавливание. Горячая штамповка проводится при температуре пластического состояния металла. Штамповка взрывом проводится в герметичной камере, заполненной водой. Ротационное выдавливание заключается в обкатке роликом листовой заготовки по форме матрицы.

К недостаткам этих технологических процессов относятся: недостаточно высокая точность изготовления профиля; неоднородность структуры материала изделия, связанная с возникновением остаточных напряжений и деформаций по толщине и поверхности; высокая стоимость оборудования; наличие припусков на заготовке (для зажима заготовки) и связанные с этим большие отходы материала, особенно для изделий сложной формы — при штамповке; необходимость осуществления нескольких переходов при высокой стреле подъема профиля — для каждого перехода должна быть своя матрица (при ротационном выдавливании).

Рупорные пирамидальные антенны. Технологический процесс изготовления рупорных пирамидальных антенн имеет свои особенности. Так как рупорная антenna имеет сложную конфигурацию, для ее изготовления была использована разрушающаяся матрица из алюминиевого сплава Д16, который хорошо вытравливается в щелочном растворе. Процесс изготовления рупорной антены включает операции: оп1, оп2, оп3 и вытравливание матрицы раствором щелочи. После подготовки матрицы к осаждению она устанавливалась в электролитическую ванну вертикально и подсоединялась к валу вращения. Ванна заполнялась электролитом до полного погружения матрицы. Состав электролита и марка анодов приведены выше.

Процесс электролитического осаждения также состоит из двух этапов.

Первый (затяжка) проводится при тех же параметрах процесса, что и для рефлектора. Второй (формирование изделия) проводится при $q = 4...5 \text{ A/dm}^2$ и $T_b = 50...60^\circ\text{C}$. Для конкретных антенн, изготовленных нами, $t_1 = 30 \text{ мин}$, $t_2 \approx 6 \text{ ч}$. После окончания процесса осаждения матрицы с изделием вынимается из ванны, промывается водой. Снимаются технологические припуски и матрица в специальной ванне вытравливается растворо-

ром едкого натрия концентрации 0.1—0.15 кг/л при температуре $T = 95...100^\circ\text{C}$. После окончания этого процесса изготовленная антenna промывается в проточной воде и сушится горячим воздухом.

Щелевые антенны. Для изготовления щелевых антенн изготовлена матрица из алюминиевого сплава Д16. Длинная щелевая антenna с 40 прямоугольными отверстиями на излучающей поверхности, расположенными равномерно по ее длине, имеет коробчатое поперечное сечение волноводного канала.

Технологический процесс изготовления антены включает операции оп1, оп2, оп3, вытравливание матрицы раствором щелочи. После подготовки матрица устанавливается в ванне горизонтально, и ванна заполняется электролитом до полного погружения матрицы. Состав электролита и марка анодов приведены выше.

Электролитическое осаждение щелевой антены и травление матрицы после осаждения проводятся аналогично соответствующим процессам для рупорной антены.

Из отдельных щелевых антенн изготавливаются антенные решетки путем жесткого скрепления нескольких антенн (пайкой).

Волноводы. Одной из самых распространенных областей применения метода электролитического формования является изготовление разнообразных волноводов сложной структуры. Основными требованиями к ним является высокая точность изготовления и высокий класс обработки внутренних токопроводящих поверхностей.

Для осаждения волноводов использованы стальные матрицы, от которых легко отделить нарошенное изделие. В тех случаях, когда необходимо изготовить волноводный канал большой длины с малым поперечным сечением матрицы изготавливаются из титановых сплавов марки ВТ. Технологический процесс включает операции оп1, оп2, оп3 и отделение изделия от матрицы. После установки матрицы волновода и профилированных анодов ванну заполняют электролитом до полного погружения матрицы и накрывают крышкой. Состав электролита и марка анодов приведены выше. Процесс электролитического осаждения проводится в два этапа. Первый этап (затяжка) проводится при параметрах процесса приведенных выше; второй этап (формование изделия) при $q = 4...5 \text{ A/dm}^2$ и $T_b = 50...60^\circ\text{C}$. Для конкретного волновода $t_1 = 30 \text{ мин}$ и $t_2 \approx 5 \text{ ч}$.

Для снятия готового изделия также используется эффект термоудара.

Разработанные технологические процессы позволяют получить особенно точные параметры поверх-

хностей волноводов, обеспечивают несложную процедуру снятия изделия с матрицы и позволяют сохранить необходимое качество поверхности матрицы после многократного съема с них деталей.

Фоконы, фоклины (концентрирующие системы СЭ). Внутренняя поверхность для фокона является частью параболической поверхности, для фоклина — частью конуса. К малому основанию фокона или фоклина крепятся фотоэлементы для получения фотоэлектрического сигнала [20, 23, 25]. Технологический процесс изготовления фоконов включает следующие операции: оп1, оп2, сборка нескольких матриц (у нас 10 матриц) в общую оправку, электролитическое осаждение, снятие готовых изделий. После установки оправки ванна заполняется электролитом до полного погружения оправки. Состав электролита и марка анодов приведены выше.

Процесс электролитического осаждения также состоит из двух этапов.

Первый (затяжка) проводится при параметрах процесса, приведенных выше. Второй (формирование изделия) — при $q = 3\ldots4 \text{ A/dm}^2$ и $T_b = 50\ldots60^\circ\text{C}$. Для изготавливаемых фоконов $t_1 = 30 \text{ мин}$ и $t_2 \approx 4 \text{ ч}$. После окончания процесса осаждения оправка с нарощенными фоконами вынимается из ванны и промывается. Оправка разбирается на отдельные матрицы, каждая матрица подготавливается к снятию оболочки фокона. Для этого используется эффект термоудара.

Элемент коллимационного зеркала. Среди устройств АВТ особо следует выделить коллимационные зеркала, используемые для экспериментального измерения основных характеристик остронаправленных СВЧ-антенн. Для комплексного исследования космических аппаратов в наземных условиях используется универсальный компактный антенный полигон, основу которого составляет безэховая камера, стены которой покрыты поглощающим электромагнитные волны материалом, оснащенная прецизионным параболическим зеркалом. Требования к коллимационному зеркалу высокие — в частности, отклонения профиля поверхности отражения должны составлять $\varepsilon = (0.005\ldots0.007)\lambda$ (λ — длина волны).

Наиболее распространенная конструкция поверхности большого прецизионного параболического зеркала состоит из отдельных отражающих элементов, закрепленных на несущей ферменной конструкции специальными юстировочными винтами. Отражающий элемент представляет собой легкую многослойную панельную конструкцию, состоящую из тонкой лицевой параболической зеркальной поверхности и подкрепляющего слоя из несущей арматуры и вспененного эпоксидного компаунда.

Технологический процесс изготовления элемента разбит на три этапа. Первый этап — осаждение лицевой зеркальной оболочки; второй — подгонка несущей арматуры к матрице вместе с изготовленной лицевой зеркальной поверхностью и сборка формы для заливки эпоксидного компаунда. Третий этап — заливка формы смесью химических элементов, которые обеспечивают вспенивание эпоксидного компаунда.

Осаждение лицевой оболочки включает операции оп1, оп2, оп3. После подготовки матрицы она устанавливается на дно ванны осаждения. Над матрицей устанавливается на расстоянии 20—25 см профилированный анод, и ванна заполняется электролитом. Состав электролита и марка анодов приведены выше. Процесс электролитического осаждения также состоит из двух этапов, первый (затяжка) проводится при вышеупомянутых параметрах технологического процесса, второй при $q = 4\ldots5 \text{ A/dm}^2$ и $T_b = 50\ldots60^\circ\text{C}$. Для конкретного элемента зеркала $t_1 = 30 \text{ мин}$ и $t_2 \approx 8 \text{ ч}$.

После окончания осаждения матрицу с осажденной оболочкой отражательного элемента вынимают из ванны, промывают водой. Тыльная сторона оболочки (вместе с матрицей) является дном формы, в которой устанавливается арматура и проводится вспенивание эпоксидного компаунда и полимеризация смеси. Затем форма разбирается и проводится отделение готового изделия (оболочка с подкрепляющим слоем) от матрицы.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ, ПРОЧНОСТИ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ОПТИКИ

В процессе эксплуатации устройства АВТ и СЭ подвергаются различным интенсивным воздействиям. Необходимо проведение специальных исследований, подтверждающих работоспособность и высокие оптико-механические характеристики таких устройств, изготовленных на основе метода электролитического формования. Значительное число разнообразных теоретико-экспериментальных исследований динамики, прочности и оптики устройств АВТ и СЭ проведено в Институте технической механики НАНУ—НКАУ. Они тесно взаимосвязаны с выбором конструкции и разработкой эффективных технологических процессов изготовления. Отметим основные из проведенных исследований.

Проведены исследования динамики изготовленных на основе разработанных технологий крупногабаритных зеркальных антенн (параболических, сферических) при вибрационных воздействиях. Та-

кие воздействия возникают при выводе на орбиту устройств АВТ ракетами-носителями. Исследования по специальным программам проводились на вибростендах, особенностью их являлось использование высокоскоростной видеокиносъемки [7, 11, 14].

Проведены теоретико-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния, устойчивости и предельных нагрузок элементов конструкций АВТ и СЭ [11, 13, 16]. Проведение таких исследований особенно важно для тонкостенных оболочечных конструкций, к которым относятся эти элементы. В результате ряда исследований вводились изменения в конструкцию изделий с целью улучшения их прочностных и жесткостных свойств. Так для рефлектора большой зеркальной антенны, описанного выше, где весьма сложной является проблема обеспечения необходимой жест-

кости при малой толщине и большом диаметре, увеличение жесткости обеспечивалось путем загиба оболочки на краях, что давало подкрепление на краях некоторым аналогом кольца жесткости — шпангоута [8, 10, 11]. В работе [12] исследованы вопросы теплопроводности и прочности параболических рефлекторов, используемых как концентраторы солнечной энергии.

Зеркальные антенны и другие устройства АВТ и СЭ крепятся на борту космических аппаратов с помощью ферменных конструкций. В [15, 16, 26] приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований ферменных конструкций как элементов антенной структуры.

Высокие требования предъявляются к отражающим и токопроводящим поверхностям АВТ и СЭ. В [9, 11, 13] приведены результаты исследования отражательной способности и оптических свойств

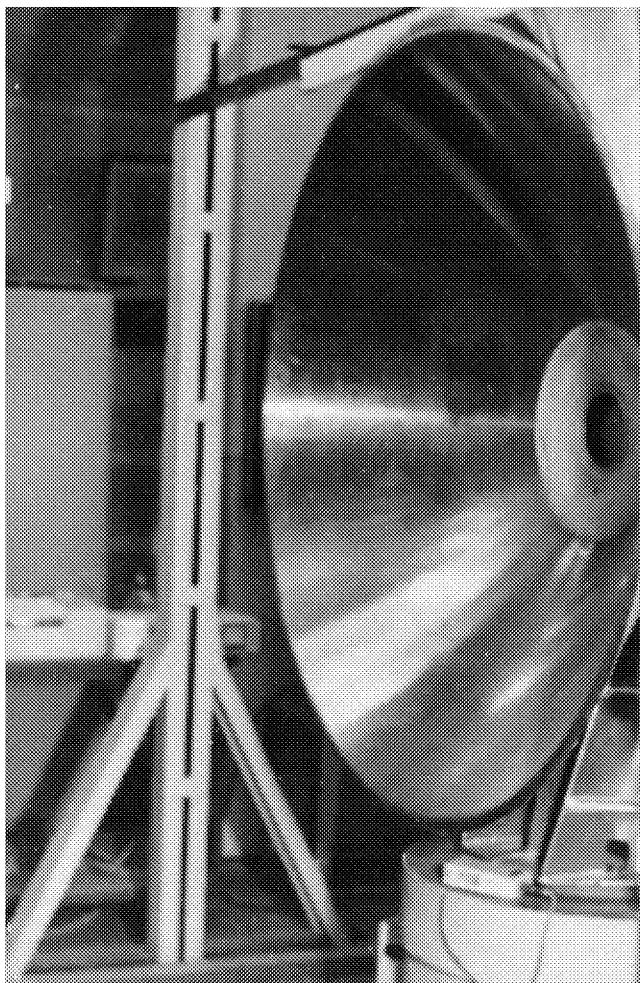


Рис. 2. Параболический рефлектор зеркальной антенны

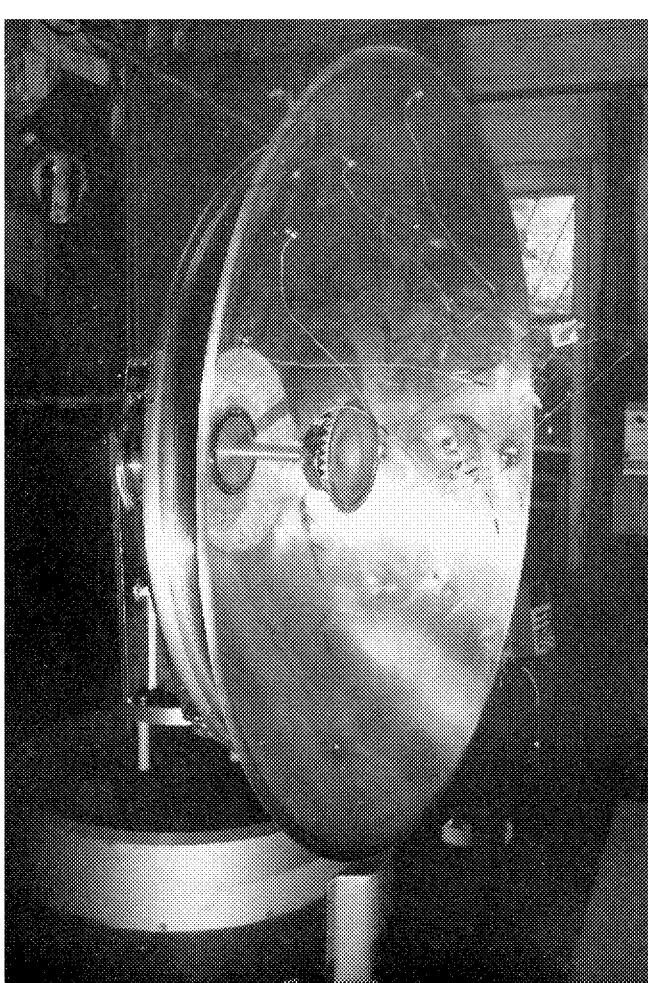


Рис. 3. Рефлектор, подготовленный к испытанию на вибростенде

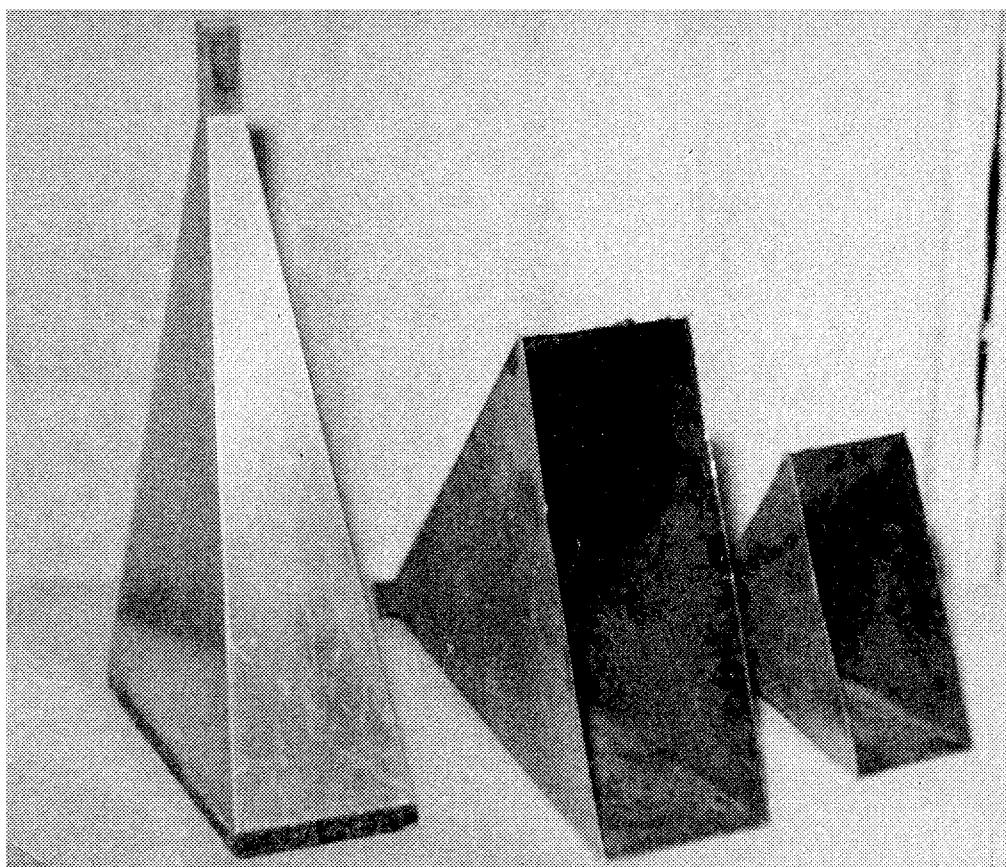


Рис. 4. Матрица для изготовления и изготовленные рупорные антенны

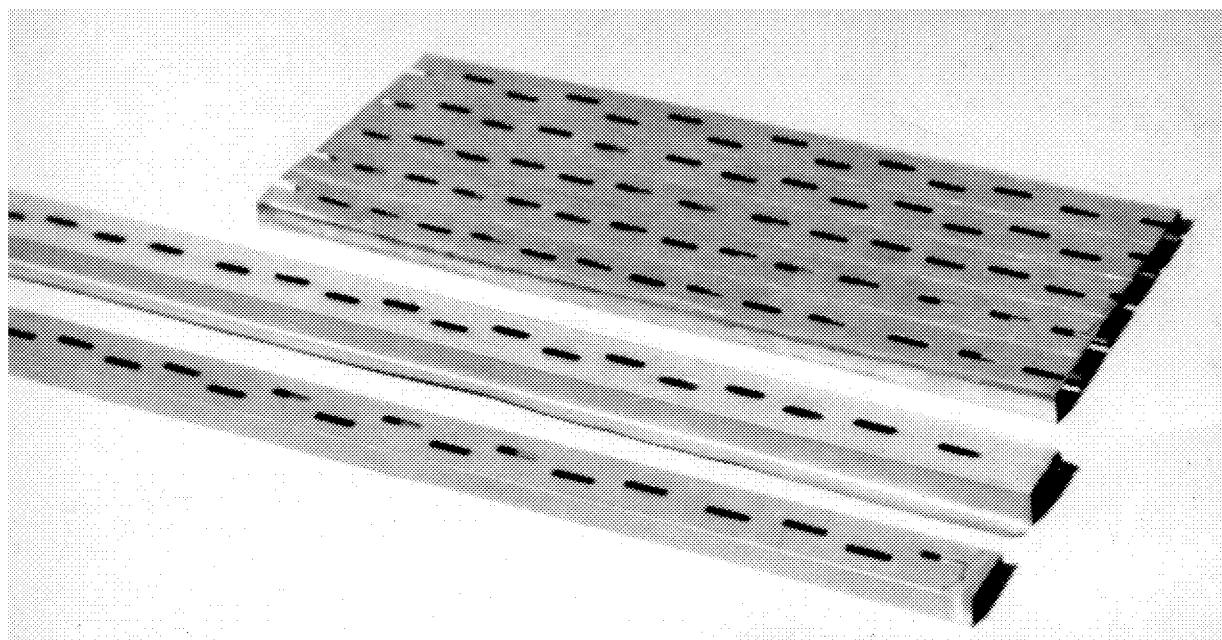


Рис. 5. Щелевая антenna и антенная решетка

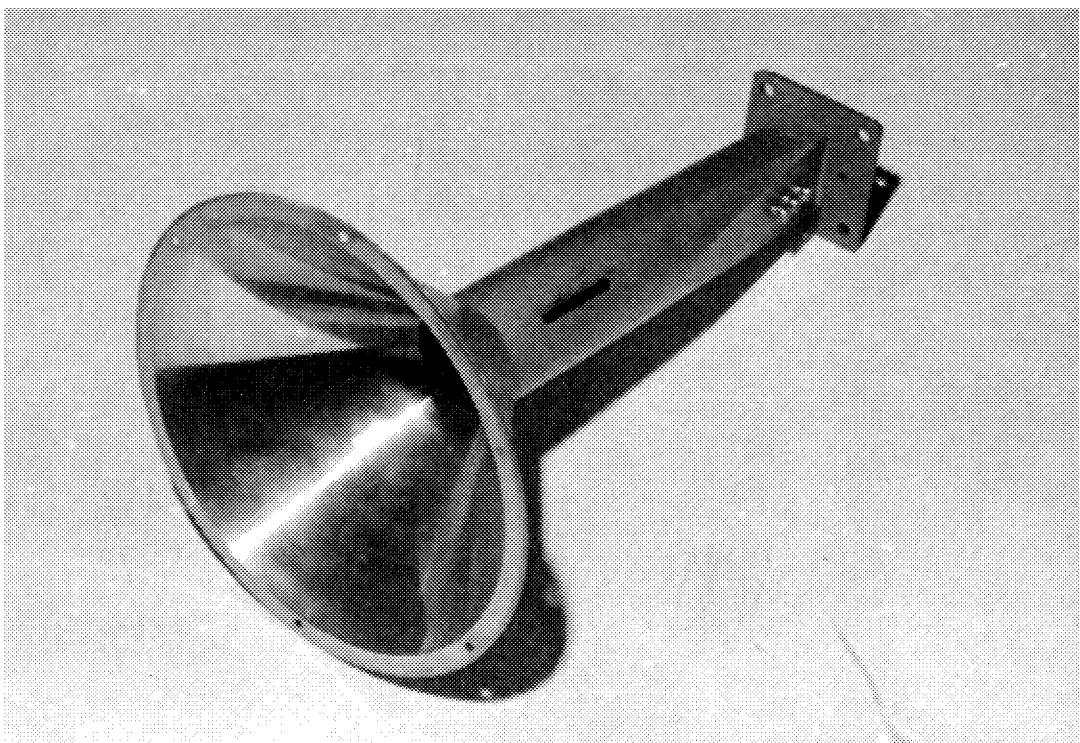


Рис. 6. Волновод

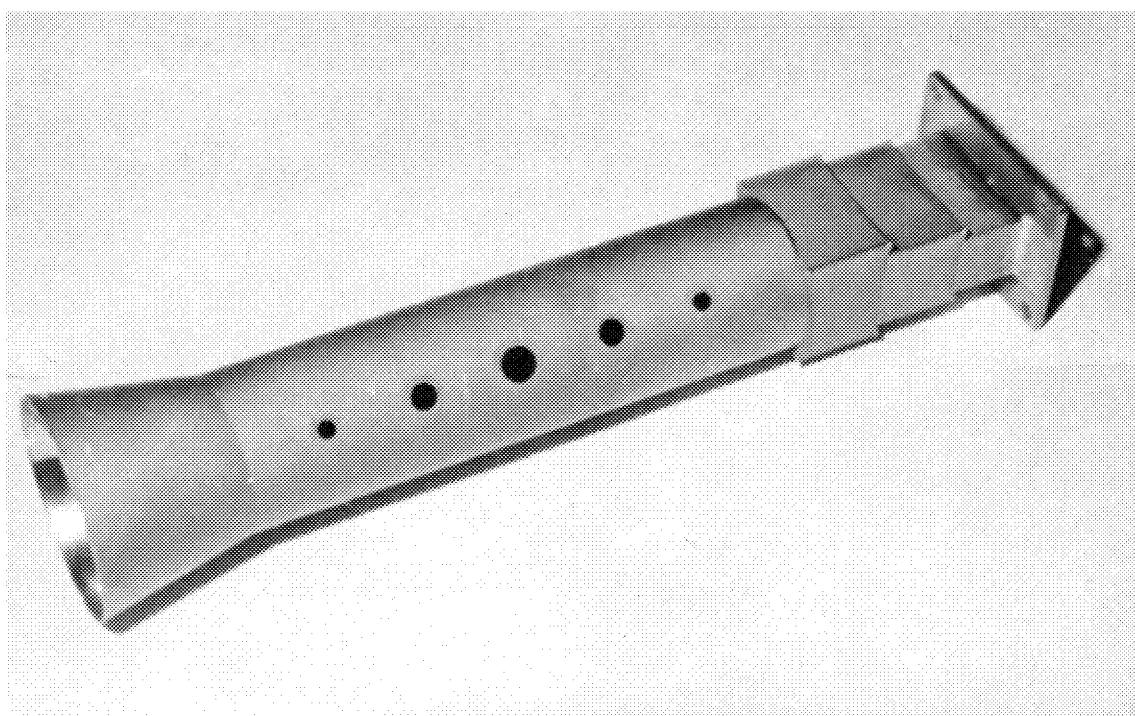


Рис. 7. Волновод

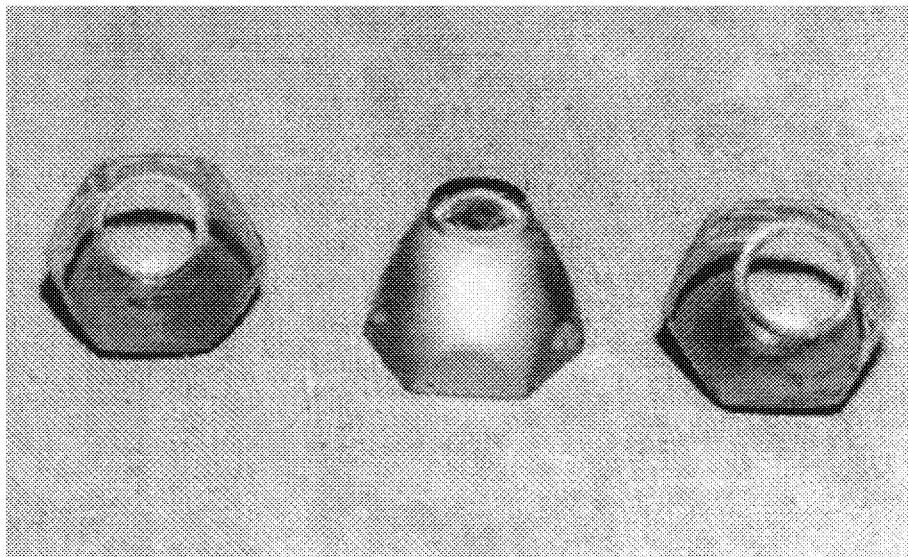


Рис. 8. Параболические концентраторы солнечной энергии — фоконы

поверхностей элементов АВТ и СЭ. Ряд этих систем (рефлекторы) могут быть использованы как концентраторы солнечной энергии. Спектральные характеристики различных материалов изучены в [21].

Проведенные исследования подтверждают высокое качество элементов устройств АВТ и СЭ, изготавливаемых на основе метода электролитического формования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод электролитического формования относится к наиболее эффективным методам, на основе которых разрабатываются технологические процессы изготовления устройств АВТ и СЭ. Он является основой для разработки безотходных технологий с существенным (по сравнению с другими технологиями) уменьшением энергозатрат и трудозатрат.

Разработаны технологические процессы изготовления параболических рефлекторов зеркальных антенн, пирамидальных и рупорных антенн, щелевых антенн, волноводов различных типов, фоконов, фоклинов, элементов коллимационного зеркала и др. На основании этих процессов изготовлены соответствующие изделия АВТ и СЭ, используемые в ракетно-космической технике.

Проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по динамике, прочности, оптике, подтверждающие эффективность из-

делий АВТ и СЭ, изготовленных на основе разработанных технологий.

На рис. 2—8 показаны изготовленные из никеля в Институте технической механики НАНУ—НКАУ некоторые изделия АВТ и СЭ на основе технологий, использующих метод электролитического формования. Параметры этих изделий были определены в результате соответствующих исследований или на основании технических заданий заказчиков.

Параболический рефlector, используемый для зеркальных антенн и для концентраторов солнечной энергии: диаметр апертуры 1.6 м, переменная толщина стенки зеркальной поверхности от 0.25 до 0.4 мм; вес 8 кг (рис. 2). На рис. 3 показан рефлектор, подготовленный к испытанию на вибростенде.

Рупорная пирамидальная антenna, состоящая из конической части прямоугольного поперечного сечения: высота 415 мм, максимальный размер поперечного сечения 322 мм × 115 мм и коробчатой части квадратного поперечного сечения: высота 160 мм, поперечное сечение 23 мм × 23 мм, толщина стенки 0.5 мм, вес 0.595 кг. На рис. 4 приведены фото матрицы и изготовленных антенн (выше приведены размеры большой антенны, для малой — соответственно размеры: конической части высота 165 мм, максимальный размер поперечного сечения 200 мм × 90 мм и коробчатой части квадратного сечения 35 мм × 35 мм, высота 25 мм, толщина стенки 0.5 мм, вес 0.315 кг).

Щелевая антenna коробчатого поперечного сече-

ния, размеры: длина 960 мм, поперечное сечение волноводного канала 23 мм × 10 мм с 40 прямоугольными отверстиями размером 16 мм × 3 мм, толщина стенки 0.5 мм, вес 0.185 кг и антенная решетка весом 0.37 кг (рис. 5).

Волновод, состоящий из соединенных конической с диаметром большого основания 85 мм и высотой 50 мм, цилиндрической с диаметром 30 мм и высотой 145 мм, которая заканчивается прямоугольным отверстием размером 23 мм × 10 мм, частей, толщина стенки 0.3 мм, общая высота 200 мм, вес 0.196 кг (рис. 6).

Волновод, состоящий из соединенных конической с диаметром большого основания 50 мм и высотой 40 мм, толщиной стенки 0.4 мм, цилиндрической с диаметром 36 мм и высотой 135 мм, толщиной стенки 0.5 мм и с 5 круговыми отверстиями, имеющими диаметры 3, 5, 7 мм, частей и так называемого перехода Чебышева из трех ступеней прямоугольного поперечного сечения с размерами 32 мм × 28.6 мм, 33 мм × 21.5 мм, 34 мм × 16 мм, высотами соответственно 20.5 мм, 20 мм, 19 мм, толщиной стенки 0.5 мм, общая высота 245 мм, вес 0.21 кг (рис. 7).

Фоконы — малые параболические концентраторы солнечной энергии: высота фокона 30 мм, малое основание — круг диаметром 18 мм, большое основание — правильный шестиугольник со стороной 20 мм, толщина стенки 0.2 м, вес 4.5 г (рис. 8).

В Институте технической механики НАНУ—НКАУ изготовлены также разнообразные другие изделия АВТ и СЭ на основе технологических процессов, использующих метод электролитического формования.

1. А. с. 1611995 СССР МКИ⁴ 601. Установка для изготовления изделий методом гальванопластики / Гудрамович В. С., Гайдученко А. П., Коваленко А. И. Приорит. изобрет. 20.10.1988. Зарегистрир. 8.08.1990.
2. Антенны: Современное состояние и проблемы. — М.: Сов. радио, 1979.—Вып. 16.—624 с.
3. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе. — М.: Машиностроение, 1974.—291 с.
4. Ванке В. А., Лопухин В. А., Саввин В. Л. Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физ. наук.—1977.—123. Вып. 4.—С. 633—657.
5. Вячеславов П. М., Волянук Г. А. Электролитическое формование. — Л.: Машиностроение, 1979.—197 с.
6. Гальванопластика. Справочник / Под ред. А. М. Гинберга, А. Ф. Иванова, Л. Л. Кравченко. — М.: Металлургия, 1987.—736 с.
7. Гудрамович В. С., Баранов Н. Г., Коновалов Н. А., Майтала И. М. Колебания оболочек рефлекторов зеркальных антенн при вибрационном возбуждении // Прикладная механика.—1991.—27, № 1.—С. 64—70.
8. Гудрамович В. С., Гайдученко А. П., Диковский И. А. и др. Применение технологических процессов гальванопластики для производства рельефных поверхностей деталей

- // Перспективы применения полимерных композиций и технологических процессов гальванопластики в производстве формообразующих элементов оснастки. — Л.: Изд-во Ленингр. дом научно-техн. пропаганды, 1989.—С. 20—28.
9. Гудрамович В. С., Гайдученко А. П., Диковский И. А., Стаценко И. Н. Экспериментальные исследования оптических свойств крупногабаритных рефлекторов как элементов космических телесуточников // Крупногабаритные космические конструкции: Тез. докл. Всесоюзн. конф. (Севастополь, 1990). — Севастополь: РДЭНТМ «Знание», 1990.—С. 41.
 10. Гудрамович В. С., Диковский И. А., Коваленко А. И. Технология изготовления элементов крупногабаритных космических антенн на основе метода электролитического формования // Проблемы космической технологии металлов: Сб. научн. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Изд-во ИЭС им. Е. О. Патона, 1986.—С. 77—82.
 11. Гудрамович В. С., Диковский И. А., Макеев Е. М. Тонкостенные элементы зеркальных антенн. — Киев: Наук. думка, 1986.—152 с.
 12. Гудрамович В. С., Диковский И. А., Сельский Ю. А. Параболические оболочки под действием солнечного излучения // Прикладная механика.—1987.—23, № 11.—С. 38—45.
 13. Гудрамович В. С., Диковский И. А., Стаценко И. Н. Исследование массогабаритных и прочностных характеристик складных концентраторов световых и электромагнитных потоков // Матер. междунар. конф. по крупногабаритным космическим конструкциям (Новгород). — Новгород: Изд-во НГУ, 1993.—С. 16—17.
 14. Гудрамович В. С., Коновалов Н. А., Коваленко В. И. и др. Исследования динамики антенн с использованием высокоскоростной видеосъемки // Высокоскоростная фотография и фотоника: Тез. докл. 18 научно-технич. конф. (Москва, 1997). — М.: Изд-во ВИИФО, 1997.—С. 23.
 15. Гудрамович В. С., Макеев Е. М., Деменков А. Ф., Шацилло С. И. Деформирование многопролетной стержневой ферменной конструкции // Проблемы космической технологии металлов: Сб. научн. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Изд-во ИЭС им. Е. О. Патона, 1986.—С. 71—76.
 16. Гудрамович В. С., Макеев Е. М., Семененко В. П. Вопросы прочности и жесткости элементов космических ферменных конструкций // Матер. I Всесоюзн. семинара «Проблемы космической технологии металлов» (Киев, 1985). — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 31—39.
 17. Конюхов С. Н. Научно-технические направления разработок космических аппаратов КБ «Южное» им. М. К. Янгеля // Космічна наука наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 12—34.
 18. Нариманов Е. А. Космические солнечные электростанции. — М.: Знание, 1991.—64 с.
 19. Пилипенко В. В. Техническая механика в ракетно-космических исследованиях: разработки ИТМ НАН и НКА Украины // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5/6.—С. 65—83.
 20. Саймон В. Е., Норед Д. М. Системы электропитания пилотируемых космических аппаратов // ТИИЭП.—75, № 3.—С. 6—45.
 21. Степний А. И., Гудрамович В. С., Карнажицкий А. А., Наумов В. В. Экспериментальные исследования спектральных характеристик элементов конструкционных материалов ракетной техники // Ракетно-космическая техника: Фундаментальные проблемы механики и теплообменов: Тез. докл. международной конф. (Москва, 1998). — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998.—С. 146.
 22. Украина: Эффективность малой энергетики. — Киев: ЕС Energy Center (Tacis), 1996.—280 с.

-
- 23. Хамакава Й. Фотоэнергетика // В мире науки: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987.—№ 6.—С. 53—59.
 - 24. Якоби Б. С. Работы по электрохимии: Сб. статей и материалов / Под ред. А. Н. Фрумкина. — М., Л.: Изд-во АН СССР, 1957.—301 с.
 - 25. Glaser P. E. Perspectives on Satellite Solar Power // J. Energy.—1977.—1, N 2.—P. 75—84.
 - 26. Gudramovich V. S., Demenkov A. F. Influence of damage of rocket-space girder structures on their deformation and carrying capacity // 5 th China-Russian-Ukrainian Symposium on Space Science and Technology. 1th Intern. Forum on Astronautics and Aeronautics. China. Symp. proc. — Harbin: Publ. Institute of Technology, 2000.—P. 121—127.
 - 27. Gudramovich V. S., Gaiduchenko A. P. Galvanoplastics-based technology for the production of antenna equipment and radiant-energy concentrators // Proc. 5 th European conf. on Advanced Materials and Processes and Applications. V. 4. Characterization and Production // Design. — Zwijndrecht: Publ. Netherlands Soc. Mater. Sci, 1997.—P. 475—478.
 - 28. Gudramovich V. S., Gaiduchenko A. P., Kovalenko A. I. Electroforming-based technology for the production of radiant-energy concentrators and antenna-waveguide devices // Proc. 4 th Ukraine-Russia-China Symposium on Space Science and Technology. — Kiev, 1996.—Vol. 1.—P. 121—122.
 - 29. Holloway P. F., Carret L. B. Concept for and Utility of, Future Space Central-Power Stations // J. Spacecraft and Rockets.—1982.—19, N 2.—P. 97—98.
-

ELECTROFORMING-BASED TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING ANTENNA-WAVEGUIDE AND SOLAR POWER DEVICES

V. S. Gudramovich, A. P. Gaiduchenko, and A. I. Kovalenko

Technologies based on the electroforming method for manufacturing antenna-waveguides and solar power devices of various types are developed. The technological processes for manufacturing optical-type antennas, pyramidal antennas, slot antennas, supported antenna mirror elements, concentrators for solar batteries are described. The results of the theoretical and experimental investigations of the dynamics, strength, heat conduction, and optics of the corresponding devices are summarized.